

# Effect of a lateral wind on the turbulent mixing of jet plumes (ジェット流の乱流混合に及ぼす横風の影響)

著者	遠藤 浩
号	341
発行年	1972
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/23675">http://hdl.handle.net/10097/23675</a>

氏名・（本籍）	<sup>えん</sup> 遠 <sup>どう</sup> 藤 <sup>ひろし</sup> 浩
学位の種類	理 学 博 士
学位記番号	理 第 3 4 1 号
学位授与年月日	昭和 4 7 年 1 月 2 6 日
学位授与の要件	学位規則第 5 条第 2 項該当
最 終 学 歴	昭和 29 年 3 月 東北大学理学部天文及び地球物理学科第二卒業
学位論文題目	Effect of a lateral wind on the turbulent mixing of jet plumes (ジェット流の乱流混合に及ぼす横風の影響)
論文審査委員	(主査) 山 本 義 一 教 授 鳥 羽 良 明 教 授 教 授 上 山 弘 助教授 田 中 正 之

## 論 文 目 次

- 1 緒 言
- 2 研究の沿革
- 3 二次元湾曲ジェットの乱流混合に及ぼす流線曲率の影響
  - 3・1 数学的解析と相似解
  - 3・2 実 験
  - 3・3 結果と考察
  - 3・4 乱流応力の曲率因数の評価
- 4 柱状湾曲ジェットの乱流混合に及ぼす横風の影響
  - 4・1 数学的モデル
  - 4・2 実 験
  - 4・3 実験常数の決定
  - 4・4 湾曲ジェットの主要特性量の推定
  - 4・5 柱状湾曲ジェットの乱流混合の三次元的性格
- 5 結 語
- 付 録 速度ベクトルと乱れのインタミッテンシの測定装置の特性
- 参 考 文 献

## 論文内容要旨

大気中を上昇するジェット流は周囲の空気と乱流混合を行なって減衰する。この現象は煙突からの煙の拡散・テルミック、積乱雲の原因となる強い上昇気流の問題に密接な関連がある。大気は静止していることは稀であるから、このような上昇流は横風を受けて湾曲することが多い。著者はジェットの湾曲がその乱流混合に著しい変化を与えることに着目し、この現象の理論的、実験的解明を行なった。

まず線状ジェット源から横風中に斜めに吹き出す二次元ジェット流の流線曲率が乱流混合に及ぼす効果を相似解を手がかりにして解析した。乱れた流体の運動を記述するレイノルズ方程式をジェットの軸に沿う曲線座標系で書き表わす。この方程式中に現れる乱流応力 $\tau$ は流線の湾曲の結果遠心力の作用でジェットの凸側で増大する。この効果をプラントルの乱流応力の仮定を拡張した表式

$$\tau = \rho \chi b U_0 \left( \frac{\partial U}{\partial y} - C K U \right)$$

の右辺の曲率 $K$ と曲率因数 $C$ を含む項で代表させる。この表現を用いてレイノルズ方程式が相似解をもつ条件を求めた。この条件は縦方向および横方向速度ならびに静圧のプロフィルの幾何学的相似を要求すると同時に、ジェットに沿う横幅、中心速度、曲率、横断流速の変化を制約する。相似条件の成立は実験によって確認された。すなわち、細長いスリットから風に対し $0^\circ \sim 30^\circ$ の角度で吹き出されたジェット流の速度と静圧のプロフィルの相似は、吹出口の近傍を除けば近似的ではあるが満されている。また乱流構造の相似も熱線風速計を用いて確認されたが、湾曲の影響でジェットの凸側で乱れが強い非対称な相似プロフィルを生じ、乱れの平衡値は湾曲度の大きいジェット程高くなる。乱流混合はジェット内の乱流領域と外部の層流領域の界面の大きな渦によって制御される。この渦によって界面が波動を生じ、界面付近に乱れの間欠現象（インタミッテンシ）が引き起される。これを特別に製作したインタミッテンシメータで測定すると、凸側ではこの波動が外部の層流領域内により深く侵入している。このことから判断すると凸側で乱流混合がより激しく起っている。以上の結果、湾曲した二次元乱流ジェットにおいても幾何学的ならびに力学的相似が成立するが、流れ場の構造は流線曲率の影響でジェットの中心線に対し非対称な発達を遂げる。

乱流応力の表式中の曲率因数 $C$ の値について過去の2つの文献のデータには一貫性がない。著者は相似解から導かれる相似パラメーター間の一般の関係から $C$ の値が決定できることに着目し、相似パラメータの値は実験データから与えて、 $C$ を評価した。その結果 $C$ は初期混合領域では1.0程度になるが、平衡領域では3に減少することが示され、3～8の範囲にまたがる過去のデータを統一的に解釈することができた。

煙突から出る煙のような柱状ジェット流の場合は、横風を貫通し易いから、曲率は前述の場合に比べて小さく、従って流線曲率の効果も二義的なものになる。このジェット流の特徴は、背面に互に逆回転する1対の定常渦が形成され、ジェットに沿って流れて、ジェットが減衰した後も明瞭に

存続することである。この渦対に誘導されて外部の空気がジェットの後部から中心部に運ばれ、高速のジェットと接触する結果、背面も乱流混合が著しく強化される。著者はこの渦対の発生機構と、それが乱流混合に及ぼす効果を統一的に取扱ひ、ジェットの成長、中心速度の減衰、渦対の強さやエントレメントなど、湾曲ジェットに関する主要な特性量を計算する半経験的理論を確立した。以下にその概略を述べる。

横風中で柱状ジェットが乱流混合する場合は周囲の流れの状況が複雑で乱流応力の定式化が困難であるのと、湾曲に伴ってジェットの断面形が円から馬蹄形に変わるため、相似解による取り扱ひは不可能である。そこで簡単な乱流輸送の仮定（エントレメント）に立脚した理論的モデルを用いた。ジェット流は円形断面をもつ湾曲した流管内を流れ、断面内では速度は一様であると仮定する。この流管の表面を通して外気が内部にエントレメントされるため柱面上に発生する圧力は、準2次元の複素速度ポテンシャルから導かれる。この圧力と空気力学的抵抗がジェット流の湾曲による遠心力とつり合うという条件を記述した垂直力の平衡方程式が立てられる。そのほか、ジェット柱内の質量流と運動流について、エントレメントされた外気の持ち込む増加分を考慮に入れた保存方程式が成立する。この3つの方程式が閉じた系を作るためにはエントレメント $E$ を他の変数によって表現しなければならない。 $E$ の表式中では上述の渦対の効果を渦対の誘導する流入速度に比例する付加項によって表現する。従って $E$ は軸速度 $\chi$ による項と渦動項の和として次のように書かれる。

$$E = E_1 \rho r (U_j - U_1 \cos \theta) + E_2 \rho \dot{t}^{-1} \mu$$

この結果、方程式系には新たな変数 $\mu$ （渦対のモーメント）が導入された。 $\mu$ は渦層理論の考えによってジェット流管面上の圧力分布を等価な渦層で置き換える方法により、既に求めた表面圧力積分に結びつけられ、結局、方程式系は閉じられる。この系に含まれる3つの実験常数 $E_1$ 、 $E_2$ 、 $C_d$ のうち軸速度 $\chi$ に関係する $E_1$ は軸対称ジェットのエントレメントの測定データから決定できるが、渦動エントレメント係数 $E_2$ と空気力学的抵抗係数 $C_d$ は実験から直接決定することはできない。そこでこれを理論値と実験値のマッチングにより決定した。マッチングの対象となったジェットの特性量は $E_2$ と $C_d$ に最も顕著に依存し、かつ実験的に精度よく決定できるジェットの経路と横幅である。最適マッチングを与えるパラメータとして $C_d = 1.4$ 、 $E_1 = 0.16\pi$ 、 $E_2 = 0.42$ が選ばれた。

上述の結果、湾曲ジェットの主要な特性量を計算する半経験的方法が確立された。この方法は吹出角が中程度（ $60^\circ \sim 120^\circ$ ）の強いジェット（横風速度の4倍以上）の径路について実験結果と良く合う計算結果を与えた。また、ジェットの径路に沿う渦対のモーメント $\mu$ の変化の予測値も実験とよく一致した。他方、ジェットが乱流混合の結果減衰して周囲と区別がつかなくなる距離（貫通深度）の推定にも、この理論的方法是役立つことが示された。

以上の結果から判断して、我々の理論モデルは横風中のジェットの湾曲と発達の物理的機構を正しく把握しているとみなすことができる。

湾曲した柱状ジェットの乱流混合の三次元性は、ジェット背面に形成される渦対の作用にもとずいて現れる。これに関連してジェット断面内の速度ベクトル分布を見ると、吹出口から離れるにつ

れジェット の両翼の背面に一つずつの集中渦が形成されていき、この渦対の誘導によって背後からジェット の中心に向って空気が流れ込み、高速のジェット から軸運動量の供給を受けて急速にジェット の運動に合流して行く状況がわかる。また、ジェット に伴う乱れの分布を見ると、背面中央部に一對のピークがあり、これは背後から流れ込んだ空気がジェット 本体と出合って激しく混合していることを示す。このように横風中のジェット のエントレインメントには軸対称ジェット には見られない新しい要素（渦動エントレインメント）が加わる。これは主としてジェット の背面におけるエントレインメントを強化している。さらにジェット の下流のインタミッテンスファクタの分布を見ると、固体柱の下流ならば完全乱流領域の幅が広がって行くのに対し、ジェット の下流では逆に狭まって行き消滅する傾向を示す。これは背後の空気がジェット 内に多量にエントレンされるためその補償流として外部から乱れの少ない気流が後方に流れ込む結果である。渦動エントレインメント効果を理論計算値についてみれば、軸速度シヤ項は吹出口付近でだけ重要で、その後の全発達段階を通じて渦動項が支配的な役割を果すことが示され、これは上述の観測事実と符合する。

以上のように、二次元ジェット 流が横風によって湾曲する場合は、横風のない場合に比べて、乱流混合には量的変化が現れるだけで、相似な平衡状態の成立という本質的特徴は保存される。これに対し、柱状（三次元）ジェット 流の場合は乱流混合の機構に本質的な変化が起る。すなわち、ジェット の背面に形成される渦の影響により乱流構造は著しい三次元的性格を帯び、それは下流になるほど強く現れるので、ジェット は相似な平衡状態に到達することはない。

## 論文審査結果の要旨

遠藤浩提出の論文は大気中を上昇するジェット流が横風の影響を受けて湾曲する場合、ジェット流と周囲の空気との乱流混合に顕著な変化の起こることに着目し、この現象の理論的・実験的解明を試みたものである。著者はまず線状ジェット源から横風中に斜めに吹き出す二次元ジェット流の流線曲率が乱流混合に及ぼす効果に関して、相似解と実験結果とに基づいて解析を行っている。その結果によると、湾曲した二次元ジェットにおいても、幾何学的ならびに力学的相似が成立しているが、流れの場の構造は流線曲率の影響でジェットの中心線に対して非対称な発達を遂げ、ジェットの凸側で乱れが強く乱流混合も凸側でより激しく起っていること、乱れの平衡値は湾曲度の大きいジェット程高くなっていること、乱流混合はジェット内の乱流領域と外側の層流領域の界面の大きな渦によって制御されており、この渦により界面に波動を生じ界面付近に乱れの間欠現象（インタミッテンシ）がひきおこされていることなどの重要な性質が明らかにされている。また乱流応力におよぼす湾曲の効果を表わす曲率因子の値について、従来の研究では一貫性がなかったが、著者は相似解から得られる相似パラメータ間の一般的关系を用い、自身の実験データからこれを評価している。それによると曲率因子は初期混合領域では10程度の値をとるが平衡領域では3程度に減少することが示され、3～8の範囲にまたがる従来の実験結果を測定条件の違いとして統一的に解釈することが出来る。

次に著者は、柱状湾曲ジェットの乱流混合におよぼす横風の影響に関する理論的・実験的研究を行っている。柱状ジェット流の場合は横風を貫通し易い為曲率は前述の場合に比して小さく、従って流線曲率の効果は二義的なものとなる。このジェット流の特徴は背面に互いに逆回転する一対の定常渦が形成されこれがジェットに沿って流れてジェットが減衰した後も明瞭に存続することである。著者はこの渦対の発生機構とそれが乱流混合におよぼす効果を統一的に取扱ひジェットの成長、中心速度の減衰、渦対の強さやエントレンメントなど、湾曲ジェットに関する主要な特性量をよく記述する半経験的理論の確立に成功している。

また、渦対に誘導されて外部の空気がジェットの背後から中心部に運ばれ、高速ジェットと接触する結果、背面で乱流混合が著しく強化されること、横風中の柱状ジェットは軸対称ジェットでは見られないこの渦動エントレンメントで特徴づけられること、その乱流構造は著しく三次元的性格を帯び、それは下流になる程強く現われるので、この場合ジェットは相似な平衡状態に到達することはないことなどを明らかにしている。これらの結果は空気力学における一つの重要な寄与と考えられるので学位論文として合格と認めた。